

振動光学系の Modulation Transfer Function

服 部 璋^{*} ・ 二 井 義 則^{**}

Modulation Transfer Function of the Vibrating Optical System

Akira HATTORI and Yoshinori NII

ABSTRACT

Method and Apparatus of measuring the modulation transfer function of image depend on vibration is investigated. If resultant modulation transfer function of vibrating optical system is $R_v(N)$, and that of stationary optical system is $R_o(N)$, the modulation transfer function depend on vibration $R_m(N)$ is given by $R_m(N) = R_v(N) / R_o(N)$. the experimental data of this method is in satisfactory agreement with the theoretical curve $J_0(2\pi NX_m)$.

In this paper, studies on the relation among spurious resolution, letter recognition and modulation transfer function depend on vibration are reported. A results of these studies will be used widely in the future the improvement of image quality in the transmission of television image from high speed moving objects.

1. 緒 論

飛行機, ロケット, 人工衛星などから, 写真機, テレビジョンカメラを用いて撮影する場合, これらの高速物体が直線運動, 振動運動をしているために生ずる画像の悪化はどうしても避けられない。また, 自動車, 電車, 船などより写真機, 映画撮影機, テレビジョンカメラなどで撮影する場合も, これらの交通機関が種々な運動をしているために生じる画像の悪化がある。

光学系が運動しているために生ずる画像の悪化, および画像の特性についての研究はかなり以前より行なわれている。⁽¹⁾ これらの研究は解像力により画像の悪化の程度を求めたり, 画像評価法として近年有力になった Optical Transfer Function (OTF) によるもの⁽³⁾が主なるものである。しかし, OTF による研究は理論的に計算により求めた研究が主であって, その実験的研究, 特に振動運動についての研究は充分なもの

が行なわれていない。そこで, 本研究は光学系が振動している場合の画像の良さを OTF のうち, 特に Modulation Transfer Function (MTF) により求める測定方法, 測定装置などについて研究を行なった。また, 画像が振動しているときの画像の特性のうち, 偽解像および, Recognition についての測定を行ない, これらと MTF との関連についても検討を行なってみた。

これらの研究結果は, 写真撮影する際のカメラぶれの問題から, 高速運動体よりのテレビジョン画像伝送などにおける画質の改善に役立つものになるはずである。

2. 測定原理

光学系およびテストチャートが静止しているときの写真フィルム像についての MTF を $R_o(N)$ とし, また, 光学系の MTF を $R_L(N)$, 写

真フィルムのMTFを $R_{EM}(N)$ とすると、MTFの特性よりして次式となる。

$$R_o(N) = R_L(N) \cdot R_{EM}(N) \quad (1)$$

光学系またはテストチャートが振動しているときのMTFを $R_v(N)$ とすると、同様にして、

$$R_v(N) = R_o(N) \cdot R_m(N) \quad (2)$$

とおける。この式における $R_m(N)$ は光学系またはテストチャートが振動していることに関連したMTFである。

従って、 $R_v(N)$ および $R_o(N)$ を測定すれば、

$$R_m(N) = \frac{R_v(N)}{R_o(N)} \quad (3)$$

より実験的に求めることができる。

空間周波数 N の正弦波チャートにより作られる像面の任意の点 X における像の強度分布 $I(X)$ が

$$I(X) = I_o + I_m \cos 2\pi NX \quad (4)$$

である光学系において、像が次式のような調和振動をしているとする。

$$X = X_o + X_m \sin \omega t \quad (5)$$

(4)式における I_o, I_m , (5)式における X_o, X_m は定数である。

像における任意の時刻 t における強度分布 $I(X, t)$ は

$$I(X, t) = I_o + I_m \cos(X_o + X_m \sin \omega t) \quad (6)$$

で与えられる。そして、任意の点 X における露出時間 T の間の平均の強さ $I(X)$ は、

$$\begin{aligned} I(X) &= \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ I_o + I_m \cos 2\pi N \right. \\ &\quad \left. (X_o + X_m \sin \omega t) \right\} dt \\ &= I_o + I_m \left[J_o(2\pi NX_m) \right] \cos 2\pi NX \end{aligned} \quad (7)$$

となる。(7)式における $[J_o(2\pi NX_m)]$ が振動に関連しているMTFである⁽⁴⁾。そして、これが(3)式により実験的に求められる $R_m(N)$ と同じものになるはずである。すなわち、

$$R_m(N) = J_o(2\pi NX_m) \quad (8)$$

である。

正弦波チャートまたは光学系が振幅 X_m で振動しているときは(8)式のMTFは、

$$J_o(2\pi NX_m) \quad (9)$$

となる。ただし、(9)における M は像の横倍率である。

(8)式が成り立つことは、後述の実験結果である表1および図5において確かめられている。

3. 測定装置

測定装置の概略は図1、図2に示した。

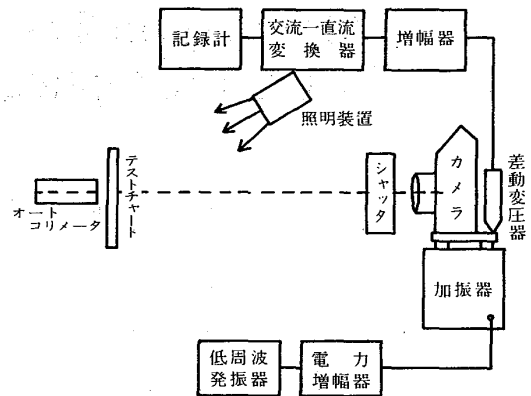


図1 測定装置概略図(I)

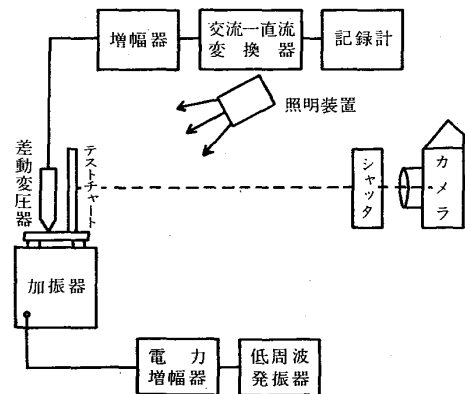


図2 測定装置概略図(II)

図1はカメラを加振器にとりつけて上下方向に振動させて、テストチャートの像をカメラにより写真撮影する装置である。図2はテストチャートを加振器にとりつけて上下方向に振動させて、テストチャートの像をカメラにより写真撮影する装置である。これらの装置の加振器は図3に示したような20W動電型加振器であって、低周波発振器からの出力を電力増幅器で増幅し、その出力で駆動させた。振動数、振幅は差動変圧器、交流-直流変換器、記録計およびシンクロスコープを用いて、波形を観測しながら記録できるようにした。

図1のようにカメラを加振器にとりつけた場合は、レンズの軸が鉛直面内に振れて、そのための像の悪化がかなり大きい。この振れはできるだけ小さくなるように工夫した。この振れの程度はオートコリメータとカメラのレンズにとりつけた平面鏡により測定した。また、シャッタ振れによる像の悪化を除ぐため、別のカメラのシャッタを用いて撮影した。この写真は図3の(b)に示した。

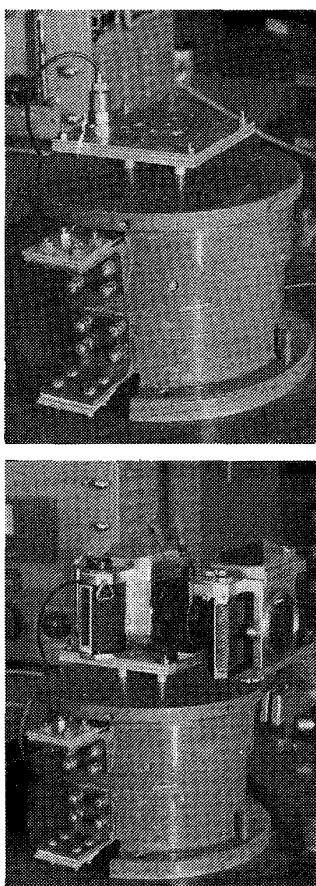


図3 (a) 加振器
(b) カメラをとった加振器

テストチャートは3種類のものからできていて、その実際の写真を示したものが図4である。中央の下テストチャートは正弦波テストチャートで10本の線群よりできている。黒さの強度分布が正弦波状に変化している。 $\frac{1}{8}$ に縮小して写真フィルム上に撮影したとき、画像の空間周波数は16本/mmになる。これはテレビジョン像、写真像の評価において、空間周波数16本/mmに対するOptical Transfer Functionの値が重要とされているためである⁽⁵⁾。中央の上の方のテストチャートは $\frac{1}{8}$ に縮小して写真フィルム上に撮影したとき、16本/mm、48本/mm、80本/mmの空

間周波数になるような矩形波テストチャートである。これら3種類の空間周波数に対する値を用いて、次に示すColtmanの式⁽⁶⁾により換算すると、正弦波テストチャートに対するMTFの値が求まる。

$$R(N) = \frac{\pi}{4} \left\{ r(N) + \frac{r(3N)}{3} - \frac{r(5N)}{5} + \frac{r(7N)}{7} + \frac{r(11N)}{11} - \frac{r(13N)}{13} - \frac{r(15N)}{15} - \frac{r(17N)}{17} + \frac{r(19N)}{19} + \dots \right\} \quad (10)$$

(10)における $r(N)$ は矩形波テストチャートを用いて測定したMTFの値である。

また、この矩形波テストチャートは9本の線群よりできていて、MTF測定以外に偽解像の測定に使用する。

両側にあるものは、Recognition用テストチャートである。このチャートはタイプライターのアルファベットの大文字26字をランダムに配列したものである。

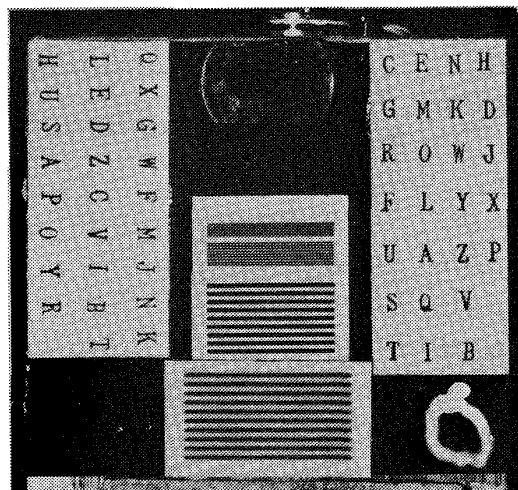


図4 テストチャート

向って左側のものは、振動方向に対して文字を直角にしたもので、以後これを横配列と記し、右側のものは縦配列のものと記す。

テストチャートと撮影カメラの距離は、像の大きさが $\frac{1}{8}$ に縮小されるようなものにした。カメラは焦点距離50mm、F1.4の標準レンズを用いた一眼レフカメラである。カメラにより正弦波テストチャートおよび矩形波テストチャートを撮影した写真フィルムは、試作した高性能のミクロデンシトメータを用いて像の強度分布を走

査する。そして、写真測光法により上記の走査結果からMTFの値を求める。

4. 測定方法および測定結果

4-1 MTFの測定値と理論値

テストチャートおよびカメラが静止しているときについて、 $\frac{1}{25}$ に縮小して写真フィルムに撮影し、マイクロデンシトメータでテストチャートの像の強度分布を走査し、写真測光法により、Modulation Transfer Function (MTF) $R_o(16)$ を求める。次に、テストチャートを加振器により振動数30Hzで振動させ、その全振幅を0~1.5mmに種々と変えて、上記と同じカメラ、写真フィルムで撮影し、上述と同じ方法でMTF $R_v(16)$ を求める。

像振動に関連しているMTF $R_m(16)$ は $R_o(16)$ および $R_v(16)$ の測定値を(3)式、すなわち

$$R_m(16) = R_v(16) / R_o(16)$$

に入れて求めることができる。

種々な全振幅について測定した $R_m(16)$ の値が表1の第2欄に示してある。

表1 像振動に関連しているMTF

全振幅 (mm)	MTF $R_m(16)$		テストチャートの像の線数(本)
	測定値	理論値	
0.	1.00	1.00	9
0.037	0.97	0.98	9
0.076	0.89	0.91	9
0.117	0.79	0.79	9
0.157	0.65	0.64	9
0.196	0.48	0.47	9
0.235	0.32	0.28	9
0.275	0.12	0.10	9
0.315	-0.05	-0.07	9
0.36	-0.22	-0.22	8
0.40	-0.33	-0.32	8
0.44	-0.39	-0.39	8
0.48	-0.40	-0.40	8
0.52	-0.41	-0.38	8
0.56	-0.31	-0.31	8

—の記号は偽解像であることを示す。

また、 $R_m(16)$ の理論値は(8)式に示した如く、 $J_o(2\pi NX_m)$ になるはずである。この計算値

は表1の第3欄に示してある。これらの測定値と計算値をグラフにしたものが図5である。

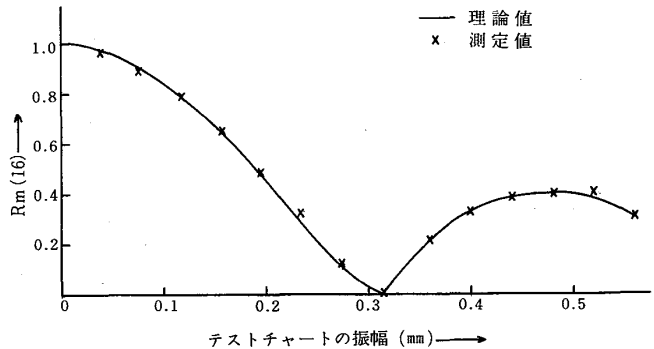


図5 振動に関連しているMTF $R_m(16)$ の測定値と理論値

計算値と測定値がかなり良く一致していることがわかる。このことは、上記の測定方法が妥当であることを明らかにしている。

表1の第4欄は偽解像を示したものである。すなわち、テストチャートは9本の平行線群であるが、振動の全振幅をだんだんと大きくして行き、全振幅が0.315mm位になると、9本の平行線群はほとんど分離して見えない。全振幅が0.36mm位になると、かなりはっきりと平行線群が分離して見えるが、線の数が8本となる。全振幅が0.48mm位になると、8本の平行線群の像が一番はっきりと見える。この現象を偽解像⁽⁷⁾と云っている。

全振幅が大きくなると、MTFが小さくなったものがまた大きくなってくる。表1ではこの偽解像のMTFの値には(—)の記号をつけてある。この偽解像のMTFの値についても、測定値と理論値がかなり良く一致していることがわかる。

4-2 カメラ振動とテストチャート振動のMTF

図1の装置により、テストチャートを固定し、カメラを加振器で、25Hz、50Hzの振動数で振動させ、全振幅を0~0.6mmまで変化させたときのMTF $R_m(16)$ を測定した。次に、図2の装置によりカメラを固定し、テストチャートを加振器で上記と同じように振動させたときの、MTF $R_m(16)$ を測定した。

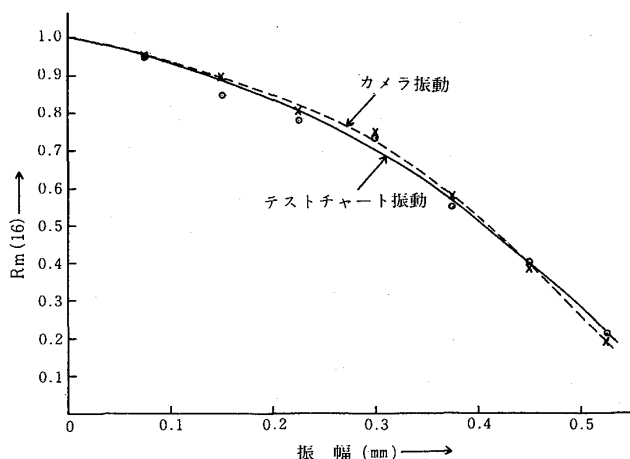


図6 振動光学系のMTF(振動数25Hz)

図6はカメラおよびテストチャートを振動数25 Hz で振動させたときのMTF $R_m(16)$ の値を示したものである。横軸は振幅をmm単位で示し、縦軸はMTF $R_m(16)$ の値を示している。また、○印のものがテストチャートを振動させたとき、×印のものがカメラを振動させたときである。両者ともほとんど同じ曲線を示している。

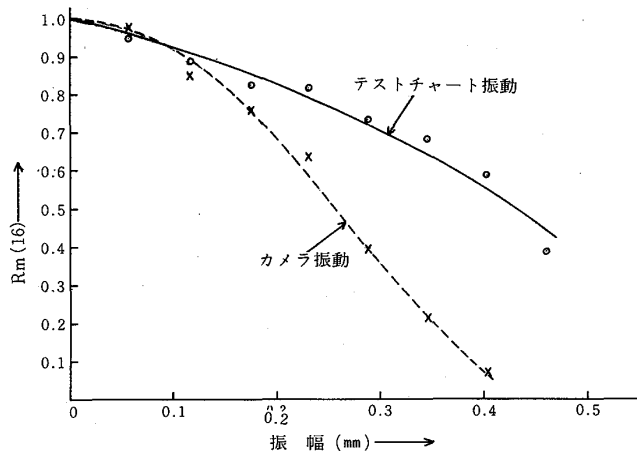


図7 振動光学系のMTF(振動数50Hz)

図7はカメラおよびテストチャートを振動数50Hz で振動させたときのMTF $R_m(16)$ の値を示したものである。横軸および縦軸は図6と同じものを示し、○印および×印のものも図6の場合と同じものを示している。図6と比較してみると、カメラを振動させた場合が、テストチャートを振動させた場合よりMTF $R_m(16)$ の値の減少が大きくなっている。すなわち、像の悪化が著しくなっている。これは加振器の振動の振動数が大きくなると、カメラのレンズの

光軸のぶれの影響によりMTFの値の減少が著しくなるものと思われる。テストチャートを振動させた場合は、振動数が25Hz、でも50Hzでも振幅の増加によるMTFの減少の様子は大体同じ傾向にあることが、図6、図7によりわかると思う。

被写体を振動させ、カメラを固定して撮影した場合は、写真像のMTFの減少は振動の振幅に大きく影響され、振動数にはあまり関係しない。被写体を固定し、カメラを加振器で振動させて撮影した場合は、写真像のMTFの減少が振動の振幅以外に、振動数にもかなり影響されることが明らかとなった。

4-3 振動光学系のMTFと像の良さとの関連

カメラまたはテストチャートを振動させた場合の写真像のMTFと像の良さとの関連について検討を行なってみた。図4に示したようなMTF測定用およびRecognition測定用のテストチャートを振動数20Hz～50Hz、振幅を0～1.0mmの範囲に変化させて振動させ、固定したカメラで写真撮影して、それぞれの場合のMTF、文字識別および偽解像について測定を行なった。

図8は振動数が30Hzでテストチャートを振動させ、その振動の振幅が0mm、0.12mm、0.20mm、0.32mm、0.44mm、および0.52mmの場合の写真である。これらの測定を行なったものの中、主なる測定値を示したものが表2である。

表2 テストチャートを振動数30Hzで振動させた場合のMTFとRecognition

テストチャートの振幅mm	像の振幅mm	MTF $R_m(16)$	文字識別		偽解像
			縦配列	横配列	
0.12	0.005	0.79	100%	100%	なし
0.19	0.008	0.50	89	73	なし
0.32	0.013	-0.05	50	0	あり(8本)
0.52	0.021	-0.41	8	0	あり(8本)

(-) の記号は偽解像であることを示す。

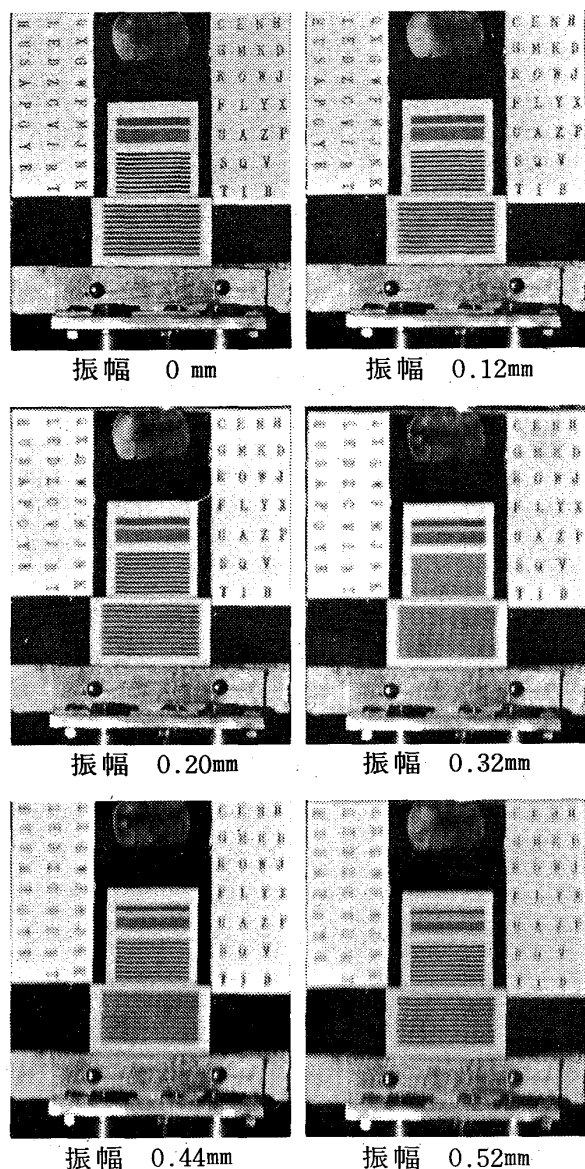


図8 テストチャートを振動させたときの振幅と像

5. 結 論

カメラまたは被写体が振動している場合の写真像の振動に関連しているMTFの測定方法、測定装置および画像特性について研究を行なった。その結果、次のような事項が得られた。

- (1) 本研究において行なった写真像の振動に関連したMTFの測定結果は理論的に得られた計算値とかなり良き一致を示した。

- (2) カメラを振動させた場合とテストチャートを振動させた場合、振幅の増加によるMTFの減少の程度は、振動数が25 Hz位ではほとんど差はない。振動数が50 Hz位になると、カメラを振動させた場合がかなりMTFの減少の程度が大きくなる。

- (3) 振動の振幅を増加させると、MTFは減少して行くが、偽解像の現象が生じて、MTFは少し増加する。

しかし、たとえば9本の平行線群の像は8本となる。

- (4) 偽解像はMTFの値が0になる振動の振幅において現われ始める。あるいは $J_0(2\pi N X_m) = 0$ になる X_m の値の像の振幅において偽解像の現象は現われ始める。

- (5) MTFの値が減少すると、文字識別は悪くなる。

- (6) 振動に関連しているMTFの値は同じでも、振動方向に対して横配列にした文字の方が、縦配列にした文字よりも識別しにくい。

おわりに、本研究に対して多大のご協力をして戴いた広島大学工学部西村行雄氏、および岡本裕幸氏に深く感謝の意を表する。

【 参 考 文 献 】

- (1) たとえば, L. O. Hendeberg and E. Welander: Appl. Opt., 2(1963)379, K. Singh, R. Rattan and J. N. Maggo: Appl. Opt., 14(1975)500.
- (2) たとえば, D. P. Paris: Photo. Sci. and Eng., 7(1963)233.
- (3) たとえば, F. Scott: Phot. Sci. and Eng., 9(1965)252, A. A. Sawchuk: J. Opt. Soc. Am., 63(1973)1052.
- (4) A. W. Lohmann and D. P. Paris: Appl. Opt., 4(1965)393.
- (5) たとえば, 木下幸次郎他: 応用物理 29(1960)195.
- (6) J. W. Coltman: J. Opt. Soc. Am., 44(1954)468.
- (7) たとえば, M. R. Nagel: J. Opt. Soc. Am., 51(1961)780.